

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Жученко О. А.

### 1. Вступ

Споживачами вуглецевих виробів є різні галузі промисловості, в яких виробництво пов'язане з необхідністю використання електротермічних технологічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Виробництво вуглецевих виробів характеризується значною ресурсо- та енергоємністю, тому актуальною є задача підвищення ефективності даного виробництва шляхом впровадження оптимальних режимів роботи його складових технологічних процесів. Розв'язання даної задачі передбачає проведення експериментальних досліджень технологічних процесів, у тому числі шляхом імітаційного моделювання та дослідження, за результатами яких має бути створена і впроваджена система оптимального керування ними.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

*Об'єкт дослідження* – процес формування вуглецевих виробів.

Одним з основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес їх формування продавлюванням електродної маси через мундштук відповідної форми у гідравлічному пресі. Саме на етапі пресування електродних заготовок закладаються в основному всі спадкові властивості, що визначають якість готових виробів [1, 2].

Під час ведення процесу необхідно забезпечувати заданий температурний режим, тому процес формування вуглецевих виробів характеризується значною енергоємністю. Тому актуальною є задача підвищення його ефективності шляхом впровадження оптимальних енергозощаджуючих режимів його роботи [2]. Розв'язання даної задачі передбачає створення ефективної системи оптимального керування даним процесом.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження практичних аспектів впровадження КІН-алгоритмів у складі системи керування процесом формування вуглецевих виробів та налаштування такої системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести аналіз процесу формування з точки зору керування ним.
2. Провести синтез відповідної системи керуванням, яка буде задовольняти вимогам ресурсо- та енергозбереження з використанням КІН-алгоритму.

### 4. Дослідження існуючих рішень проблеми

У роботі [3] розроблена стратегія оптимального переключення нагрівачів, яка забезпечує розігрів пресу з незначним температурним перегрівом. Для ефективної стабілізації температури процесу формування запропоновані методи керування [4–6], основані на прогнозувальній моделі. У [7–9] представлені багатовимірні системи керування, метою яких є компенсація збурень, що діють у режимі розігріву пресу.

Процес формування вуглецевих виробів є типовим циклічним процесом. Для таких процесів задача керування полягає, як правило, у тому, щоб реалізувати такі керування, які б забезпечили відслідковування однією або декількома вихідними змінними наперед заданої траєкторії руху, яка повторюється від циклу до циклу. Таке завдання може бути виконане стандартним ПІД-регулятором. Однак недоліком такого керування є те, що при цьому ніяк не враховується досвід, набутий на попередніх циклах роботи.

У зв'язку з цим доцільним видається застосування керування з ітеративним навчанням (КІН) [10–14]. Даний метод якраз і передбачає формування керувань не тільки за похибкою поточного керування, а й за інформацією з попередніх циклів роботи. Головна задача КІН полягає у створенні такого алгоритму, який генерує керувальні сигнали у такий спосіб, що якість керування покращується від одного циклу роботи (ітерації) до наступного.

Поняття керування з ітеративним навчанням вперше було введено у роботі [10], а пізніше математично сформульовано у [11]. З того часу багато зусиль було докладено для розробки та дослідження даного методу керування. КІН було застосовано для керування багатьох об'єктів, таких як реактори та дистиляційні колони періодичної дії, пресування [12, 18, 19].

З огляду на проведений аналіз доцільно застосувати елементи керування з ітеративним навчанням у системі керування процесом формування вуглецевих виробів.

## 5. Методи дослідження

Передбачається, що об'єкт керування математично описується у просторі станів дискретною моделлю:

$$\begin{aligned}x_k(t+1) &= Ax_k(t) + Bu_k(t) + v_k(t), \\0 \leq t \leq N, k &= 0, 1, 2, \dots, \\y_k(t) &= Cx_k(t) + w_k(t), \\x_k &\in \mathbb{R}^n, u_k \in \mathbb{R}^m, y_k \in \mathbb{R}^p,\end{aligned}\tag{1}$$

де  $k$  – номер ітерації (циклу роботи);  $t$  – поточний час. Таким чином,  $y_k(t)$  є виходом об'єкта керування у час  $t$  на  $k$ -му циклі роботи.  $v_k(t)$  та  $w_k(t)$  – обмежені збурення, що діють на стан та вихід об'єкту відповідно. Для спрощення будемо вважати, що матриці  $A$ ,  $B$  та  $C$  є стаціонарними.

Використовуючи рівняння (1), дістанемо:

$$y_k(t) = \sum_{l=0}^{t-1} CA^{t-1-l} Bu_k(l) + h_k(t), \quad (2)$$

$$h_k(t) = CA^t x_k(0) + \sum_{l=0}^{t-1} CA^{t-1-l} v_k(l) + w_k(t). \quad (3)$$

Рівняння (2) та (3) перепишемо у матричній формі:

$$y_k = Gu_k + \eta_k, \quad (4)$$

де

$$y_k = \begin{bmatrix} y_k(1) \\ y_k(2) \\ \vdots \\ y_k(N) \end{bmatrix}, u_k = \begin{bmatrix} u_k(0) \\ u_k(1) \\ \vdots \\ u_k(N-1) \end{bmatrix}, \eta_k = \begin{bmatrix} \eta_k(1) \\ \eta_k(2) \\ \vdots \\ \eta_k(N) \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1} & CA^{N-2}B & \dots & CB \end{bmatrix}.$$

В останніх виразах опущений аргумент  $t$ . Матриця  $G$  є нижньою трикутною блочною матрицею, відомою як матриця Тепліца [13, 15]. Згідно КІН-алгоритму  $y_k$  та  $u_k$  попереднього циклу мають запам'ятовуватись для розрахунку  $u_{k+1}(t)$  поточного циклу.

В умовах відсутності збурень та похибок початкового стану система (1) перетворюється до вигляду:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(t+1) &= A\hat{x}_k(t) + Bu_k(t), \\ 0 \leq t \leq N, k &= 0, 1, 2, \dots, \\ \hat{y}_k(t) &= C\hat{x}_k(t), \\ \hat{x}_k &\in \mathfrak{R}^n, u_k \in \mathfrak{R}^m, \hat{y}_k \in \mathfrak{R}^p, \end{aligned} \quad (5)$$

де змінні з позначкою « $\wedge$ » означають «ідеальні» змінні стану та вихідні змінні, розраховані в умовах відсутності збурень та похибок початкового стану.

Для заданого на інтервалі  $1 \leq t \leq N$  виходу системи на  $(k+1)$ -му циклі роботи ідеальне оптимальне КІН визначається шляхом мінімізації по  $u_{k+1}(t)$  наступного квадратичного критерія якості:

$$J_{k+1} = \sum_{t=1}^N [r(t) - \hat{y}_{k+1}(t)]^T Q(t) [r(t) - \hat{y}_{k+1}(t)] + \sum_{t=0}^{N-1} [\Delta u_{k+1}(t)]^T R(t) [\Delta u_{k+1}(t)], \quad (6)$$

де  $\Delta u_{k+1}(t) = u_{k+1}(t) - u_k(t)$ , а вагові матриці  $Q(t)$  та  $R(t)$  – довільні симетричні додатно визначені для всіх  $t$ .

Критерій якості (6) може бути переписаний у матричній формі:

$$J_{k+1} = [r - \hat{y}_{k+1}]^T Q [r - \hat{y}_{k+1}] + \Delta u_{k+1}^T R \Delta u_{k+1} \quad (7)$$

де  $Q = \text{diag}\{Q(1), Q(2), \dots, Q(N)\}$ ,  $R = \text{diag}\{R(0), R(1), \dots, R(N-1)\}$

та

$$\hat{y}_k = \begin{bmatrix} \hat{y}_k(1) \\ \hat{y}_k(2) \\ \vdots \\ \hat{y}_k(N) \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \vdots \\ r(N) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Знаходячи похідну по  $u_{k+1}$  у виразі (7), отримуємо ідеальне оптимальне керування:

$$\hat{u}_{k+1} = \hat{u}_k + R^{-1} G^T Q [r - y_{k+1}]. \quad (9)$$

Для умов відсутності збурень та похибок початкового стану аналогічний алгоритм керування запропонований у роботі [16]:

$$S(t) = A^T S(t+1) \{I - B [B^T S(t+1) B + R(t+1)]^{-1} \times \\ \times B^T S(t+1)\} A + C^T Q(t+1) C, \\ t = 0, 1, \dots, N-1; S(N) = 0, \quad (10)$$

$$\phi_{k+1}(t) = [I + S(t) B R^{-1}(t) B^T]^{-1} [A^T \phi_{k+1}(t+1) + C^T Q(t+1) \hat{e}_k(t+1)], \\ t = 0, 1, \dots, N-1; \phi_{k+1}(N) = 0, \quad (11)$$

де  $\hat{e}_k(t+1) = r(t+1) - \hat{y}_k(t+1)$ .

Згідно [5], оптимальне керування розраховується за формулою:

$$\hat{u}_{k+1}(t) = \hat{u}_k(t) - [B^T S(t)B + R(t)]^{-1} B^T C S(t) A [\hat{x}_{k+1}(t) - \hat{x}_k(t)] + R^{-1}(t) B^T \phi_{k+1}(t). \quad (12)$$

Даний вираз свідчить про те, що ідеальне керування може бути визначено ітеративно, використовуючи ідеальне значення змінних стану  $\hat{x}_k$  та  $\hat{y}_k$  з (5).

У промислових умовах завжди існують невизначеності у діючих збуреннях, а також не завжди наступний цикл роботи повністю повторює попередній, оскільки технологічні параметри та параметри якості матеріалу можуть відрізнитись кожного циклу.

При наявності збурень та похибок початкового стану розрахунок  $u_k$  має проводитись за рівняннями (10)–(12) із заміною величин  $\hat{x}_k$  та  $\hat{y}_k$  на величини  $x_k$  та  $y_k$  відповідно, визначені за моделлю (1). Звідси, закон керування записується у вигляді:

$$u_{k+1} = u_k + R^{-1} G^T Q e_{k+1}, \quad (13)$$

$$\phi_{k+1}(t) = [I + S(t) B R^{-1}(t) B^T]^{-1} \times [A^T \phi_{k+1}(t+1) + C^T Q(t+1) e_k(t+1)],$$

$$t = 0, 1, \dots, N-1; \phi_{k+1}(N) = 0, \quad (14)$$

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) - [B^T S(t)B + R(t)]^{-1} B^T C S(t) A [x_{k+1}(t) - x_k(t)] + R^{-1}(t) B^T \phi_{k+1}(t), \quad (15)$$

де  $S(t)$  дістаємо з рівняння (10).

Важливу роль у забезпеченні робастності та збіжності наведеного вище алгоритму керування відіграє вибір матриць  $Q$  та  $R$ . Нехай:

$$R = \lambda I \text{ та } Q = \mu I,$$

де  $\lambda$  та  $\mu$  – додатні константи.

$$\text{Позначимо } \rho = \frac{\mu}{\lambda}.$$

Вибір величин  $\lambda$  та  $\mu$  повинні забезпечити робастну стійкість системи керування.

З рівнянь (13)–(15) маємо:

$$u_{k+1} = (I + \rho G^T G)^k u_0 + \sum_{l=1}^k \rho (I + \rho G^T G)^{l-1} G^T (r - \eta_{k+2-l}),$$

$$e_{k+1} = (I + \rho GG^T)^{-k} e_0 - \sum_{l=1}^k (I + \rho GG^T)^{-l} \Delta \eta_{k+2-l}.$$

Таким чином отримаємо опис ідеального закону керування.

## 6. Результати дослідження

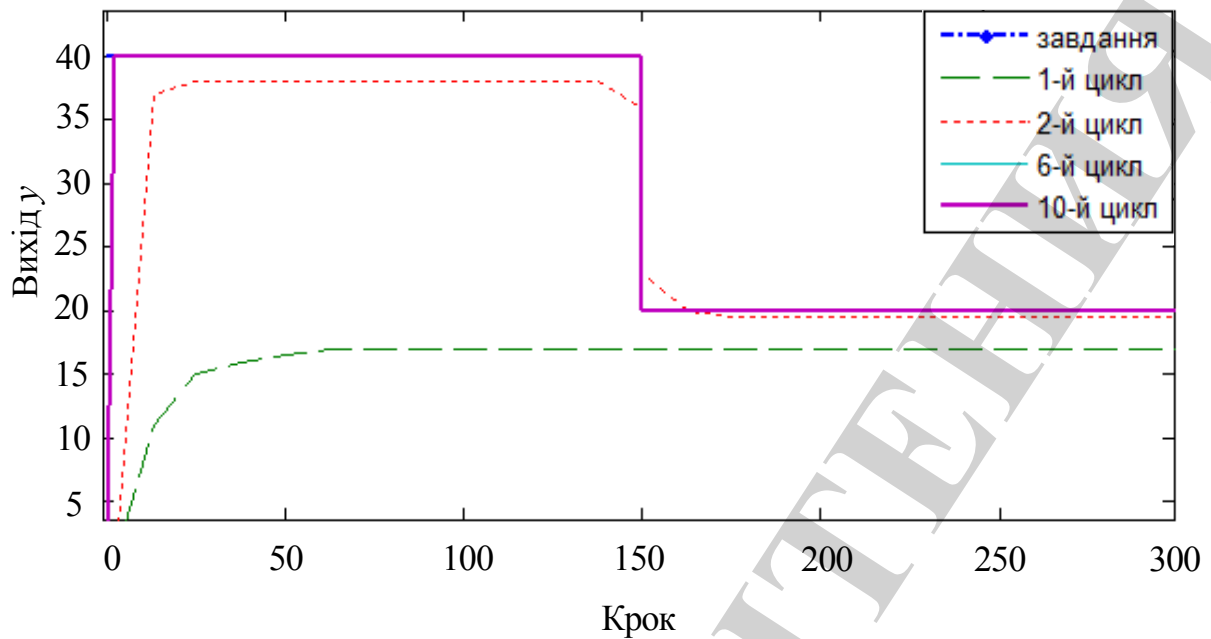
Ефективність КІН-алгоритмів досліджувалась на прикладі системи керування швидкістю процесу формування вуглецевих виробів. Для цього попередньо за допомогою засобів MatLab Simulink та Control System Toolbox [17] була побудована математична модель авторегресії – ковзного середнього. Ця модель зв'язує керувальний сигнал приводу преса зі швидкістю пресування. Після перетворення до моделі у просторі станів дана модель має вигляд:

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.22 & 0.65 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t),$$

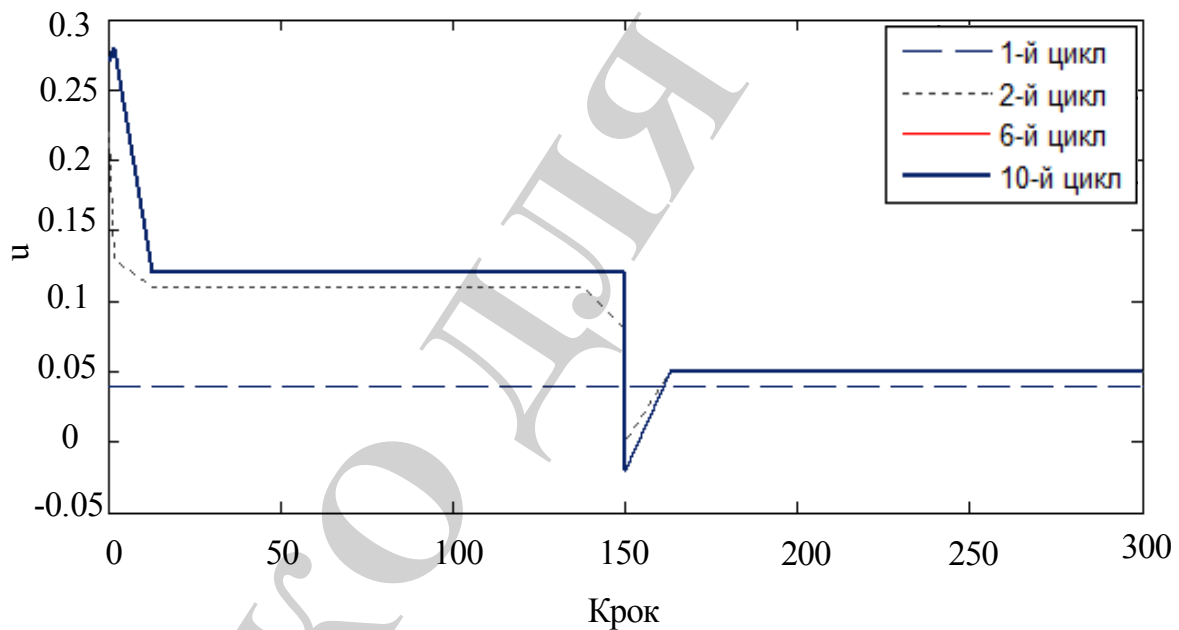
$$y(t) = [-98.2 \quad 147.37 \quad 0] x(t). \quad (16)$$

Як впливає з (16), спочатку досліджується система, у якій не діють зовнішні збурення.

Описаний вище КІН-алгоритм з параметрами налаштування  $Q = R = 1$  був застосований до системи (16). Сигнал завдання, який повинна відслідковувати досліджувана система керування, змінюється, як показано на рис. 1, *a* неперервною лінією. Сигнал керування, зображений на рис. 1, *б*, і на першому циклі роботи він дорівнює 0.04. Як видно з рис. 1, *a*, на першому циклі роботи вихідний сигнал далекий від завдання. Однак система керування демонструє високу збіжність вже на другому циклі роботи. Вихідний сигнал системи на шостому та десятому циклах свідчать про чітке відслідковування завдання (траєкторія на 6-му та 10-му циклах накладається).



*a*



*б*

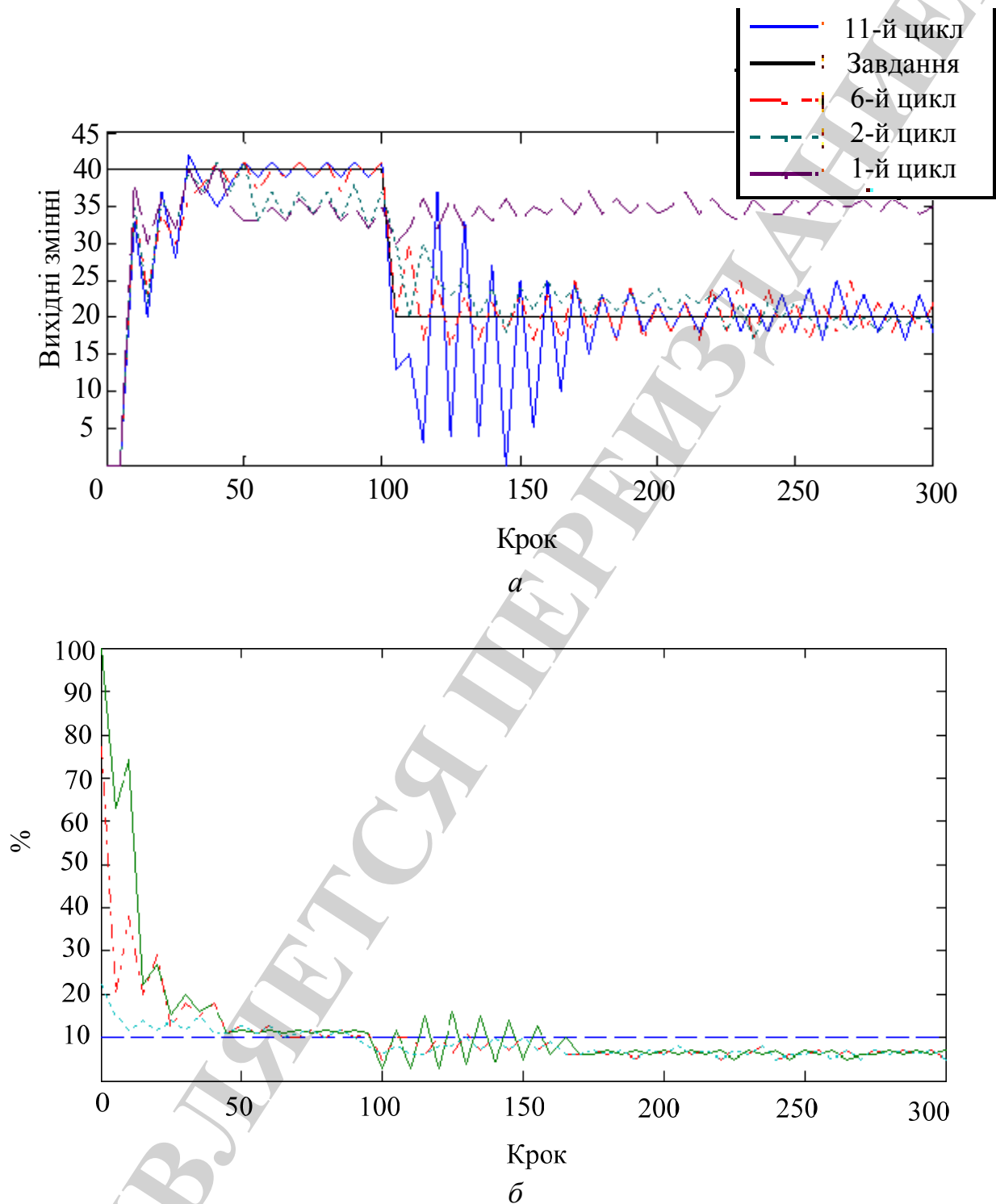
**Рис. 1.** Результати моделювання: *a* – вихідні змінні, *б* – керування

Дослідження проводилось для 10 циклів роботи. Це підтвердило, що КІН-алгоритм забезпечує високу якість керування в умовах відсутності початкових невизначеностей та зовнішніх збурень.

Надалі дослідження проводилося з урахуванням дії зовнішніх збурень.

На першому етапі дослідження матриці  $Q = R = 1$  вибрані такими ж, як і у попередньому випадку, і не змінювались на протязі всього часу дослідження. На рис. 2 показані зміни вихідного сигналу (*a*) та керування (*б*) (сигнал керування виражений у відсотках діапазону його зміни). Як видно з рис. 2, *a*, вихідний сигнал стає коливним із збільшенням амплітуди коливань при переході від одного

циклу роботи до наступного (при збільшенні  $k$ ), на відміну від результатів, отриманих раніше.

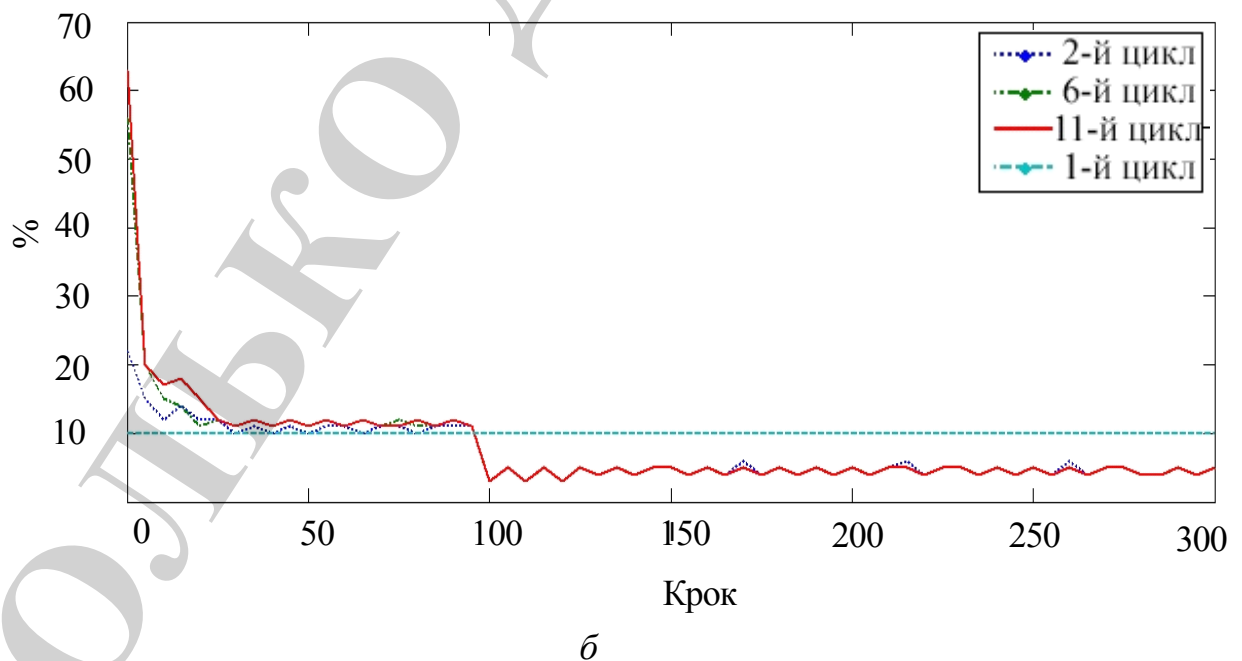
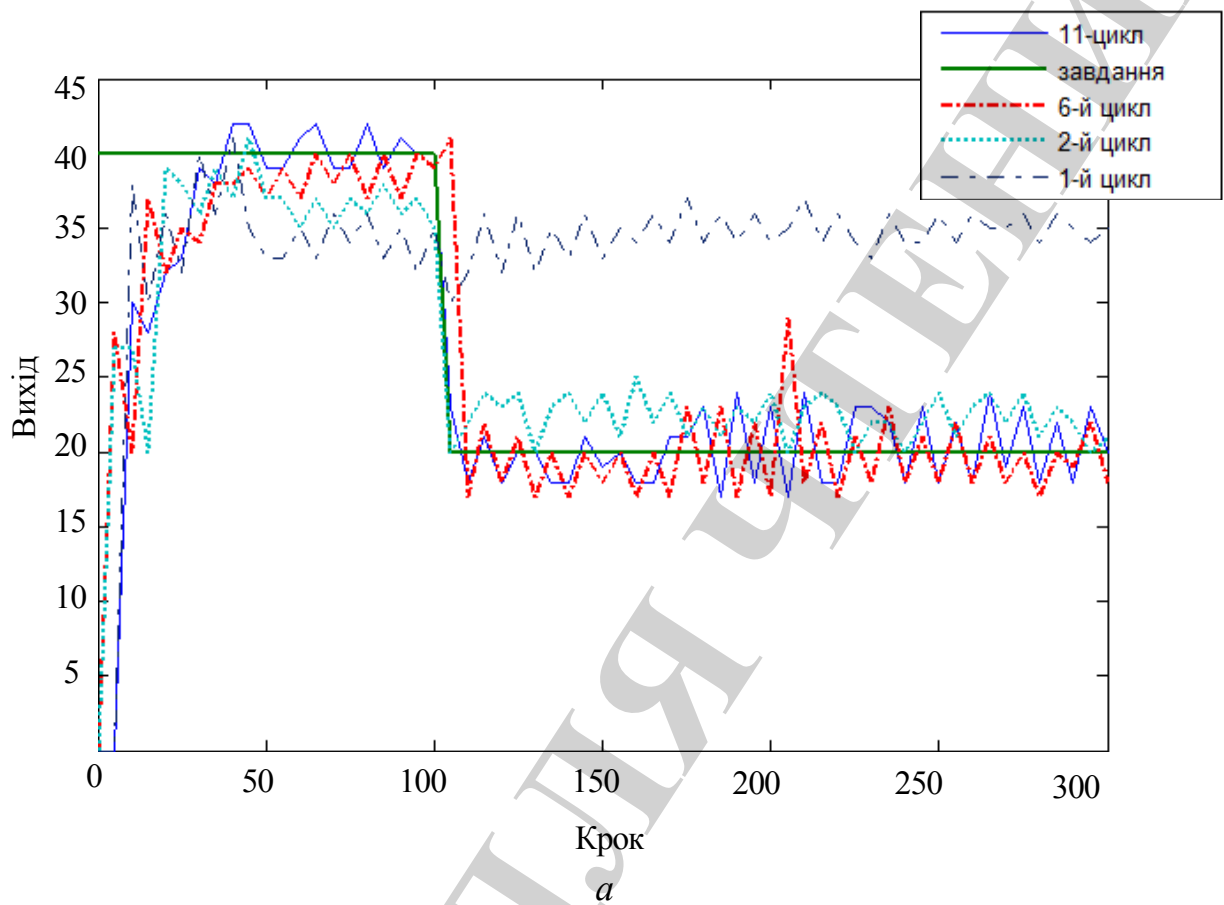


**Рис. 2.** Результати моделювання: *a* – вихідні змінні; *б* – керування

На другому етапі дослідження використовувався модифікований КІН-алгоритм з введенням змінного параметру налаштування  $\rho$ . На першому циклі роботи  $\rho = 1$ . На наступних циклах  $\rho$  зменшувалось за експоненціальним законом:  $\rho = 0.6^{k-1}$ . Відповідні сигнали виходу та керування представлені на рис. 3.



Як видно з рис. 3, на другому циклі роботи спостерігається швидка збіжність алгоритму керування. Вже на шостому циклі вихідний сигнал достатньо близький до заданого, а на десятому фактично повторює його.



**Рис. 3.** Результати моделювання з введенням змінного параметру налаштування:  
*а* – вихідні змінні; *б* – керування

Дослідження проводилось для 11 циклів роботи обладнання. Таким чином, використання модифікованого КІН-алгоритму дозволило ліквідувати коливання вихідного сигналу, забезпечило швидку збіжність до заданої траєкторії руху при збільшенні  $k$  та стійкість системи керування.

## 7. SWOT-аналіз результатів дослідження

*Strengths.* Розв'язана задача побудови системи керування процесу формування вуглецевих виробів з використанням КІН-алгоритму. Ця система керування дозволила ліквідувати коливання вихідного сигналу, забезпечило швидку збіжність до заданої траєкторії руху при збільшенні  $k$  та стійкість системи керування, що вплинуло на ефективність ведення процесу.

На відміну від аналогів запропонована система керування дозволить підвищити технологічні показники якості ведення процесу, які у подальших етапах виробництва вуглецевих виробів суттєво вплинуть на якість кінцевого виробу.

*Weaknesses.* Розроблена система керування має бути перевірена на ефективність. Дослідження на діючому обладнанні для підтвердження ефективності будуть проводитися у наступних дослідженнях автора. При введенні даного дослідження у виробництво може супроводжуватися економічними втратами через ймовірність створення аварійної ситуації тощо.

*Opportunities.* Перевірка ефективності запропонованої системи керування та її коригування за отриманими результатами є завданням подальших досліджень. Ця система керування суттєво підвищить показники якості продукції на подальших етапах процесу виробництва вуглецевих виробів.

*Threats.* Використання системи керування з елементами КІН-алгоритму потребуватиме додаткових витрат на закупівлю сучасних комп'ютерних засобів та програмного забезпечення.

## 8. Висновки

1. Проведений аналіз існуючих систем керування процесом формування вуглецевих виробів показав, що процес формування є типовим циклічним процесом. Для таких процесів задача керування полягає, як правило, у тому, щоб реалізувати такі керування, які б забезпечили відслідковування однією або декількома вихідними змінними наперед заданої траєкторії руху, яка повторюється від циклу до циклу. У зв'язку з цим доцільним видається застосування керування з ітеративним навчанням (КІН).

Запропонована нова система керування, яка передбачає керування з ітеративним навчанням процесом формування продавлюванням електродної маси через мундштук відповідної форми у гідравлічному пресі.

2. Отримано відповідний КІН-алгоритм. Дане дослідження підтвердило, що КІН-алгоритм забезпечує високу якість керування в умовах відсутності початкових невизначеностей та зовнішніх збурень. Надалі дослідження проводилося з урахуванням дії зовнішніх збурень. На другому етапі дослідження використовувався модифікований КІН-алгоритм з введенням змінного параметру налаштування  $\rho$ . Використання модифікованого КІН-алгоритму дозволило ліквідувати

коливання вихідного сигналу, забезпечило швидку збіжність до заданої траєкторії руху при збільшенні  $k$  та стійкість системи керування.

### Література

1. Chalyh, E. F. Tehnologiiia i oborudovanie elektrodnyh i elektrougol'nyh predpriatii [Text] / E. F. Chalyh. – Moscow: Metallurgiiia, 1972. – 432 p.
2. Sannikov, A. K. Proizvodstv oelektrodnoi produktsii [Text] / A. K. Sannikov, A. B. Somov, V. V. Kliuchnikov et al. – Moscow: Metallurgiiia, 1985. – 129 p.
3. Yao, K. Optimal start-up control of injection molding barrel temperature [Text] / K. Yao, F. Gao // Polymer Engineering & Science. – 2007. – Vol. 47, № 3. – P. 254–261. doi:10.1002/pen.20701
4. Lu, C.-H. Adaptive decoupling predictive temperature control for an extrusion barrel in a plastic injection molding process [Text] / C.-H. Lu, C.-C. Tsai // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2001. – Vol. 48, № 5. – P. 968–975. doi:10.1109/41.954561
5. Chia, T. L. Model predictive control helps to regulate slow processes-robust barrel temperature control [Text] / T. L. Chia // ISA Transactions. – 2002. – Vol. 41, № 4. – P. 501–509. doi:10.1016/s0019-0578(07)60105-0
6. Huang, S. Adaptive GPC control of melt temperature in injection moulding [Text] / S. Huang, K. Tan, T. Lee // ISA Transactions. – 1999. – Vol. 38, № 4. – P. 361–373. doi:10.1016/s0019-0578(99)00029-4
7. Moon, U.-C. A Practical Multiloop Controller Design for Temperature Control of a TV Glass Furnace [Text] / U.-C. Moon // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2007. – Vol. 15, № 6. – P. 1137–1142. doi:10.1109/tcst.2007.899717
8. Kaymak, D. B. Comparison of Two Types of Two-Temperature Control Structures for Reactive Distillation Columns [Text] / D. B. Kaymak, W. L. Luyben // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2005. – Vol. 44, № 13. – P. 4625–4640. doi:10.1021/ie058012m
9. Wolff, E. A. Temperature Cascade Control of Distillation Columns [Text] / E. A. Wolff, S. Skogestad // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1996. – Vol. 35, № 2. – P. 475–484. doi:10.1021/ie940758p
10. Uchiyama, M. Formation of High-Speed Motion Pattern of a Mechanical Arm by Trial [Text] / M. Uchiyama // Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers. – 1978. – Vol. 14, № 6. – P. 706–712. doi:10.9746/sicetr1965.14.706
11. Arimoto, S. Bettering operation of Robots by learning [Text] / S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki // Journal of Robotic Systems. – 1984. – Vol. 1, № 2. – P. 123–140. doi:10.1002/rob.4620010203
12. Lee, K. S. Iterative learning control of heat-up phase for a batch polymerization reactor [Text] / K. S. Lee, S. H. Bang, S. Yi, J. S. Son, S. C. Yoon // Journal of Process Control. – 1996. – Vol. 6, № 4. – P. 255–262. doi:10.1016/0959-1524(96)00048-0

13. Bottcher, A. Toeplitz Matrices, Asymptotic Linear Algebra, and Functional Analysis [Text] / A. Bottcher, S. M. Grudsky. – Birkhäuser Basel, 2000. – 112 p. doi:10.1007/978-3-0348-8395-5
14. Amann, N. Iterative learning control for discrete-time systems with exponential rate of convergence [Text] / N. Amann, D. H. Owens, E. Rogers // IEE Proceedings – Control Theory and Applications. – 1996. – Vol. 143, № 2. – P. 217–224. doi:10.1049/ip-cta:19960244
15. Li, X. An Iterative Learning Control Approach for Linear Systems With Randomly Varying Trial Lengths [Text] / X. Li, J.-X. Xu, D. Huang // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2014. – Vol. 59, № 7. – P. 1954–1960. doi:10.1109/tac.2013.2294827
16. Xu, J.-X. A survey on iterative learning control for nonlinear systems [Text] / J.-X. Xu // International Journal of Control. – 2011. – Vol. 84, № 7. – P. 1275–1294. doi:10.1080/00207179.2011.574236
17. Gantmacher, F. R. Applications of the Theory of Matrices [Text] / F. R. Gantmacher. – Dover Publications, 2005. – 336 p.
18. Owens, D. H. Iterative learning control – An optimization paradigm [Text] / D. H. Owens, J. Hatonen // Annual Reviews in Control. – 2005. – Vol. 29, № 1. – P. 57–70. doi:10.1016/j.arcontrol.2005.01.003
19. Quarteroni, A. Scientific Computing with MATLAB and Octave [Text] / A. Quarteroni, F. Saleri // Texts in Computational Science and Engineering. – Ed. 2. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 324 p. doi:10.1007/3-540-32613-8